

INFLUENCIA DE LOS DESAJUSTES DEL POZO CUÁNTICO EN MICRO-CAVIDADES SEMI-MAGNÉTICAS SEMICONDUCTORAS

David Pereda Cubián

Grupo de Técnicas Ópticas Aplicadas,
Departamento TEISA
Universidad de Cantabria
e-mail : dpcubian@teisa.unican.es

José Luis Arce Diego

Grupo de Técnicas Ópticas Aplicadas,
Departamento TEISA
Universidad de Cantabria
e-mail: jlarce@teisa.unican.es

Abstract - A Semi-magnetic Semiconductor Micro-cavity (SSM) is a Fabry-Perot (FP) cavity doped with magnetic ions to present strong magnetical properties, and where a Quantum Well (QW) has been placed in its center. The presence of the QW produces an important variation of the behaviour of the micro-cavity, because of the interaction exciton-photon, producing different phenomena, as the Rabi Splitting or a giant Faraday rotation. Two different maladjustments of the QW manufacture into the presence of an external magnetic field are studied, namely, when a frequency detuning between the cavity and the QW is produced, and when the QW is not correctly placed in the center of the micro-cavity.

I. INTRODUCCIÓN

Una *Micro-cavidad Semi-magnética Semiconductora (SSM)* es una cavidad *Fabry-Perot*, dopada con algún tipo de ión magnético con el objeto de incrementar sus propiedades magnéticas, y donde un pozo cuántico (QW) se ha situado en su centro. Este dispositivo es capaz de proporcionar unos valores de la rotación de *Faraday* enormes en el caso lineal [1], en donde la cavidad es sometida a un campo magnético, así como en el caso no lineal, en donde el campo magnético es reemplazado por una señal óptica de bombeo que produce la no-linealidad en el interior del dispositivo[2].

El diseño de estos dispositivos debe realizarse de manera muy precisa, ya que debe obtenerse un ajuste exacto entre las resonancias del pozo cuántico y de la micro-cavidad. La SSM se diseña para operar de tal manera que la resonancia de la cavidad se acople a la resonancia excitónica.

Sin embargo, se puede producir un desajuste entre la longitud de la cavidad y la frecuencia excitónica, a causa de una fabricación defectuosa de la cavidad, o una variación de las propiedades excitónicas del QW por algún efecto externo, como por ejemplo, la temperatura. Con objeto de evitarlo tanto como sea posible, y ajustar estos valores, la micro-cavidad se fabrica con un gradiente de espesor. A pesar de

ello, se pueden producir desajustes entre la cavidad y el pozo cuántico. Por otra parte, se introduce otro desajuste si el pozo cuántico no está correctamente situado en el centro de la micro-cavidad.

A continuación se presentan los efectos que dichos desajustes introducen en la respuesta de la micro-cavidad semi-magnética semiconductora. El trabajo se ha centrado en su influencia en el caso lineal, donde la micro-cavidad es sometida a un campo magnético externo. El análisis y modelado de la micro-cavidad se ha realizado mediante métodos matriciales [3].

II. COMPOSICIÓN DE LA MICRO-CAVIDAD

Una micro-cavidad semi-magnética semiconductora es una cavidad semiconductora en la que parte de sus constituyentes ha sido reemplazada por iones magnéticos. Principalmente utilizan iones Mn^{2+} , aunque los iones Fe^{2+} o Co^{2+} pueden ser empleados igualmente. Habitualmente se utiliza como material constituyente para estos dispositivos el $Cd_{1-x}Mn_xTe$.

Los semiconductores semi-magnéticos son importantes puesto que presentan propiedades muy interesantes. De acuerdo al porcentaje de dopado de iones, el valor de la energía del *gap*, E_{gap} , puede ser ajustado. Además, presentan propiedades magnéticas muy fuertes. Una micro-cavidad semi-magnética semiconductora es una cavidad *Fabry-Perot* en la que un pozo cuántico ha sido situado en su centro. Las interacciones entre los iones magnéticos y los electrones dan lugar al efecto de “*polariton magnético*”, dando como resultado una gran rotación de *Faraday*.

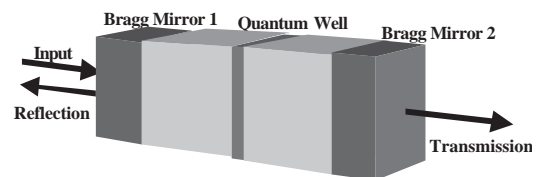


Fig. 1. Esquema de una micro-cavidad semi-magnética semiconductora

La micro-cavidad semi-magnética semiconductor está limitada por dos espejos de *Bragg* cuya longitud de onda central es la misma que la frecuencia de trabajo. Uno o varios pozos cuánticos se sitúan en el centro de la cavidad, de manera que se forma un par electrón-hueco denominado excitón, que se comporta como un átomo de hidrógeno. La transición excitónica se produce por la recombinación entre el electrón y el hueco, produciéndose a la longitud de onda excitónica. La micro-cavidad se diseña de tal manera que su longitud sea, exactamente, $\lambda/2$, donde λ es la longitud de onda de la transición excitónica, de manera que se produzca el acoplo de las resonancias de la cavidad y excitónica, dando lugar a fenómenos como el *Rabi Splitting* y un gigantesco incremento de la rotación de *Faraday*.

La micro-cavidad puede trabajar en dos diferentes configuraciones, en reflexión y en transmisión, dando lugar a diferentes resultados, siendo la configuración en reflexión la que se utiliza habitualmente, ya que los valores de rotación de *Faraday* que proporciona son más elevados.

III. ANÁLISIS TEÓRICO Y MODELADO

Para su análisis y modelado se emplean las matrices de *Scattering* ópticas. El método de las matrices de *Scattering* es un método matricial, habitualmente utilizado en micro-ondas, que permite el análisis de dispositivos con cualquier número de puertos N , mediante una matriz $N \times N$.

La principal diferencia entre la matriz de *Scattering* de micro-ondas, y la matriz de *Scattering* óptica es que, en el rango de las longitudes de onda ópticas, las dos componentes ortogonales de la luz deben de ser tenidas en cuenta. Por lo tanto, cada elemento de la matriz de *Scattering* será a su vez una matriz de dimensiones 2×2 .

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & \cdots & S_{NN} \end{pmatrix} \rightarrow S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{SS} & S_{SP} \\ S_{PS} & S_{PP} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Para obtener la matriz de *Scattering* de un dispositivo óptico, se emplean la teoría de grafos y la regla de *Mason*. Después de obtener el grafo del sistema, se pueden emplear diferentes reglas de simplificación para obtener directamente la matriz de *Scattering* o la Regla de *Mason*, cuya expresión es:

$$S_{ij} = \frac{\sum_k T_{ijk} \cdot \Delta_k}{\Delta} \quad (2)$$

Utilizando este método, se calculan los grafos de las configuraciones en reflexión y transmisión. Los elementos del grafo en la configuración en reflexión serán los siguientes:

$$\begin{aligned} T_1 &= R_{12} \\ T_2 &= T_{21} \cdot D_1 \cdot R_{qw} \cdot D_1 \cdot T_{12} \\ T_3 &= T_{21} \cdot D_2 \cdot T_{qw} \cdot D_2 \cdot R_{23} \cdot D_2 \cdot T_{qw} \cdot D_1 \cdot T_{12} \\ P_1 &= R_{21} \cdot D_1 \cdot R_{qw} \cdot D_1 \\ P_2 &= R_{qw} \cdot D_2 \cdot R_{23} \cdot D_2 \\ P_3 &= R_{21} \cdot D_1 \cdot T_{qw} \cdot D_2 \cdot R_{23} \cdot D_2 \cdot T_{qw} \cdot D_1 \\ \Delta &= I - (P_1 + P_2 + P_3) + (P_1 \cdot P_2) \\ \Delta_1 &= \Delta \\ \Delta_2 &= I - P_2 \\ \Delta_3 &= I \end{aligned} \quad (3)$$

Una vez calculada la matriz de *Scattering* se obtienen la reflectividad, y la rotación de *Faraday* a partir de los diferentes elementos de esta matriz.

$$\begin{aligned} \text{Reflectividad} &= \frac{1}{4} |S_{RX1,1} + S_{RX2,2}|^2 \\ \text{Faraday} &= \frac{1}{2} \cdot (\theta_{S1,1} - \theta_{S2,2}) \end{aligned} \quad (4)$$

IV. ERRORES EN LA MICRO-CAVIDAD: DISCUSIÓN Y RESULTADOS

A continuación, se analiza la influencia sobre la micro-cavidad del desajuste entre la cavidad y el pozo cuántico, producido bien por un desajuste entre las resonancias de la cavidad y excitónica, o por un posicionamiento incorrecto del pozo cuántico en el centro de la cavidad.

A. Desajuste entre el pozo cuántico y la cavidad

En este caso, la longitud de onda de resonancia de la cavidad y la longitud de onda excitónica no cumplen su relación debido a una fabricación incorrecta, o bien debido a la variación de las propiedades del *QW* a causa de factores externos que alteran el valor de la longitud de onda excitónica.

Se considera una micro-cavidad asimétrica con espejos cuyos valores de reflectividad son 0.76 y 0.96, y con desfases de 0.072 y 0.104. Se aplica sobre la micro-cavidad un campo magnético que produce un pseudo-efecto *Zeeman* de valor 0.25. El índice de refracción del medio que conforma la cavidad de 2.5306. Los parámetros del pozo cuántico son ancho de banda radiativo, $\Gamma=0.006$, ancho de banda homogéneo, $\gamma=0.01/\pi eV$, y energía de la emisión excitónica, $E_{exc}=1.72 eV$.

La variación de la reflectividad con respecto a la frecuencia normalizada Δ se muestra en la Figura 2.

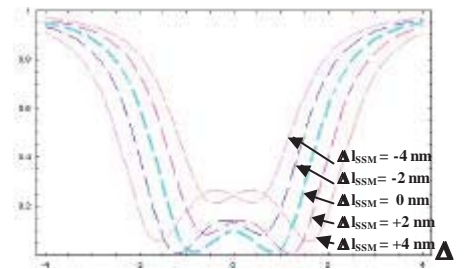


Fig. 2. Variación de la reflectividad con la longitud de la micro-cavidad.

En ella se puede observar que una pequeña variación de la longitud de la micro-cavidad, respecto el valor supuesto, produce grandes variaciones en la respuesta de la micro-cavidad. Para pequeños valores de desajuste la respuesta espectral se vuelve asimétrica, y se desplaza respecto del valor de longitud de onda excitónica, en torno a $\Delta=1$ para una diferencia de apenas 4 nm de la longitud de la micro-cavidad con respecto a su valor teórico. Esta respuesta se observa tanto en transmisión como en reflexión, así como en los valores de la rotación de *Faraday*.

B. Desajuste en la posición del QW

Este caso tiene en cuenta errores originados si en el proceso de fabricación de la micro-cavidad, el QW no se encuentra correctamente situado en el centro exacto de la micro-cavidad. De esta manera, las dos partes en que se divide la micro-cavidad tienen longitudes diferentes, y por lo tanto, el desfase producido por cada una de las mitades de la micro-cavidad no será el mismo. Los valores de la reflectividad para diferentes posiciones del QW, se presentan en la Figura 3.

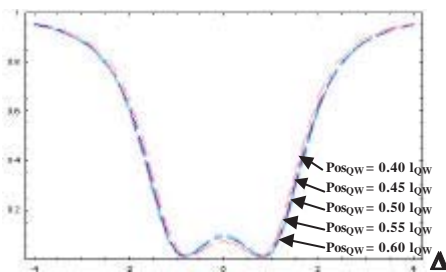


Fig. 3. Variación de la reflectividad con la posición del pozo cuántico.

Como se puede ver, en este caso, y al contrario que en el caso anterior, la variación de la reflectividad se ve muy poco afectada en un rango de valores amplio en torno a la posición central del QW. Esta variación es pequeña de igual manera tanto en la transmitividad como en la rotación de *Faraday*.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado la influencia de los errores de diseño en una micro-cavidad semi-magnética semiconductor. En primer lugar, se han descrito las micro-cavidades y sus diferentes partes, en especial, el QW. Para un correcto análisis de las micro-cavidades se ha empleado el método de las matrices de *Scattering* ópticas, que permite estudiar los dispositivos a través de la teoría de grafos y de la regla de *Mason*, al ser este método matricial muy conveniente para la configuración de este dispositivo.

A continuación, se ha analizado la influencia de dos posibles errores de diseño en la micro-cavidad. En primer lugar, la influencia de un desajuste entre las resonancias excitónica y de la cavidad, debido a una diferencia entre la longitud de la cavidad respecto del valor teórico, o a factores externos que alteran el valor de la frecuencia de resonancia excitónica. Posteriormente, se ha estudiado la influencia de una posición incorrecta del pozo cuántico en el interior de la micro-cavidad.

Como conclusión, se ha observado que es mucho más importante evitar los desajustes en la micro-cavidad debido a las diferencias entre su longitud y la resonancia excitónica que las causadas por un mal posicionamiento del QW en el centro de la micro-cavidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en colaboración con el Grupo de Materiales no lineales y Aplicaciones del Laboratorio Charles Fabry del "Institut d'Optique Théorique et Appliquée (Unité mixte de recherche I.O.T.A. – C.N.R.S. N° 8501)" de Orsay, Francia.

REFERENCIAS

- [1] M.Haddad et al., "Enhanced Faraday rotation in an asymmetric semiconductor microcavity", Solid State Communications 111, 1999.
- [2] D.Pereda-Cubían et al., "Photo-induced magneto-optic Kerr effects in asymmetric semiconductor microcavities". Physics Review B. Accepted to publish.
- [3] Y.Weissman, *Optical network theory*, Artech House, 1992.